

Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/EP04/013446

International filing date: 26 November 2004 (26.11.2004)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: DE
Number: 103 60 963.6
Filing date: 23 December 2003 (23.12.2003)

Date of receipt at the International Bureau: 15 February 2005 (15.02.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse



**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung
einer Patentanmeldung**

Aktenzeichen: 103 60 963.6

Anmeldetag: 23. Dezember 2003

Anmelder/Inhaber: LITEF GmbH, 79115 Freiburg/DE

Bezeichnung: Verfahren zur Messung von Drehra-
ten/Beschleunigungen unter Verwendung eines
Drehraten-Corioliskreisels sowie dafür geeigneter
Corioliskreisel

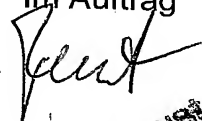
IPC: G 01 C 19/56

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**

München, den 13. Dezember 2004
Deutsches Patent- und Markenamt

Der Präsident

Im Auftrag


Faust

MÜLLER · HOFFMANN & PARTNER - PATENTANWÄLTE

European Patent Attorneys – European Trademark Attorneys

Innere Wiener Strasse 17
D-81667 München

Anwaltsakte: 55.480
Anmelderzeichen: LTF-208-DE

Mü/My/kx
23.12.2003

LITEF GmbH

Lörracher Str. 18
D-79115 Freiburg

**Verfahren zur Messung von Drehraten/Beschleunigungen unter Verwendung
eines Drehraten-Corioliskreisels sowie dafür geeigneter Corioliskreisel**

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Messung von Beschleunigungen unter Verwendung eines Drehraten-Corioliskreisels sowie einen dafür geeigneten Corioliskreisel.

5 Corioliskreisel (auch Vibrationskreisel genannt) werden in zunehmendem Umfang zu Navigationszwecken eingesetzt; sie weisen ein Massensystem auf, das in Schwingungen versetzt wird. Jedes Massensystem hat in der Regel eine Vielzahl von Schwingungsmoden, die zunächst voneinander unabhängig sind. Zum Betrieb des Corioliskreisels wird ein bestimmter Schwingungsmodus des Massensystems
10 künstlich angeregt, der im Folgenden als "Anregungsschwingung" bezeichnet wird. Wenn der Corioliskreisel gedreht wird, treten Corioliskräfte auf, die der Anregungsschwingung des Massensystems Energie entnehmen und damit einen weiteren Schwingungsmodus des Massensystems, der im Folgenden als "Ausleseschwingung" bezeichnet wird, übertragen. Um Drehungen des
15 Corioliskreisels zu ermitteln, wird die Ausleseschwingung abgegriffen und ein entsprechendes Auslesesignal daraufhin untersucht, ob Änderungen in der Amplitude der Ausleseschwingung, die ein Maß für die Drehung des Corioliskreisels darstellen, aufgetreten sind. Corioliskreisele können sowohl als Open-Loop-System als auch als Closed-Loop-System realisiert werden. In einem
20 Closed-Loop-System wird über jeweilige Regelkreise die Amplitude der Ausleseschwingung fortlaufend auf einen festen Wert - vorzugsweise Null - rückgestellt, und die Rückstellkräfte gemessen.

25 Das Massensystem des Corioliskreisels (das im Folgenden auch als "Resonator" bezeichnet wird) kann hierbei unterschiedlichst ausgestaltet sein. Beispielsweise ist es möglich, ein einstückig ausgebildetes Massensystem zu verwenden. Alternativ ist es möglich, das Massensystem in zwei Schwinger aufzuteilen, die miteinander über ein Federsystem gekoppelt sind und Relativbewegungen zueinander ausführen können. Hohe Messgenauigkeiten können insbesondere mit
30 linearen Doppelschwingersystemen erzielt werden, die aus einem gekoppelten System aus zwei linearen Schwingern bestehen. In Doppelschwingersystemen ist das Federsystem, das die beiden linearen Schwinger miteinander koppelt, im Allgemeinen so ausgestaltet, dass beide lineare Schwinger entlang einer ersten Schwingungsachse zu Schwingungen angeregt werden können, wobei der zweite
35 Schwinger zusätzlich Schwingungen entlang einer zweiten Schwingungsachse ausführen kann, die senkrecht auf der ersten Schwingungsachse steht. Die Bewegungen des zweiten Schwingers entlang der zweiten Schwingungsachse sind

hierbei als Ausleseschwingung, die Bewegungen des ersten und zweiten Schwingers entlang der ersten Schwingungsachse als Anregungsschwingung aufzufassen.

5 Lineare Doppelschwingersysteme weisen den Nachteil auf, dass die Schwingungen der beiden linearen Schwinger entlang der ersten Schwingungsachse Vibrationen bzw. Reflexionen im Kreiselrahmen bewirken können. Unter "Kreiselrahmen" wird hierbei eine mechanische, nicht-schwingende Struktur verstanden, in der die Schwinger "eingebettet" sind, beispielsweise ein nicht-schwingender Teil einer
10 Siliziumscheibe. Die Vibrationen bzw. Reflexionen im Kreiselrahmen können wiederum Störungen (beispielsweise Dämpfeffekte) der Schwingerbewegungen nach sich ziehen. So können beispielsweise die Schwingungen des ersten und zweiten linearen Schwingers entlang der ersten Schwingungsachse durch externe Vibrationen und Beschleunigungen, die entlang der ersten Schwingungsachse
15 wirken, gestört werden. Analog hierzu können externe Vibrationen und Beschleunigungen, die in Richtung der zweiten Schwingungsachse wirken, die Schwingungen des zweiten linearen Schwingers entlang dieser Schwingungsachse stören, was – genauso wie alle anderen aufgeführten Störeinflüsse – zu einer Verfälschung der gemessenen Drehrate führt.

20

Die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe ist, einen Corioliskreisel anzugeben, mit dem eine Störung der Ausleseschwingung, d. h. der Schwingung des zweiten linearen Schwingers in Richtung der zweiten Schwingungsachse aufgrund der oben genannten Störeinflüsse weitgehend vermieden werden kann.

25

Zur Lösung dieser Aufgabe stellt die Erfindung einen Corioliskreisel gemäß Patentanspruch 1 bereit. Des Weiteren stellt die Erfindung ein Verfahren zur Messung von Beschleunigungen/Drehraten unter Verwendung eines Drehraten-Corioliskreisels gemäß Patentanspruch 7 bereit. Vorteilhafte Ausgestaltungen
30 bzw. Weiterbildungen des Erfindungsgedankens finden sich in den Unteransprüchen.

35

Der erfindungsgemäße Corioliskreisel weist einen ersten und einen zweiten Resonator auf, die jeweils als gekoppeltes System aus einem ersten und einem zweiten linearen Schwinger ausgestaltet sind, wobei der erste Resonator mit dem zweiten Resonator mechanisch/elektrostatisch so verbunden/gekoppelt ist, dass beide Resonatoren entlang einer gemeinsamen Schwingungsachse gegentaktig zueinander in Schwingung versetzbar sind.

Der erfindungsgemäße Corioliskreisel weist demnach ein Massensystem auf, das aus zwei Doppelschwingersystemen (d.h. aus zwei Resonatoren) bzw. aus vier linearen Schwingern besteht. Das gegentaktige Schwingen der beiden Resonatoren zueinander bewirkt hierbei, dass bei entsprechender Ausgestaltung der beiden Resonatoren der Schwerpunkt des Massensystems erhalten bleibt. Dies hat zur Folge, dass das Schwingen des Massensystems keine externen Vibrationen erzeugen kann, die wiederum Störungen in Form von Dämpfungen/Reflexionen nach sich ziehen würden. Weiterhin haben externe Vibrationen und Beschleunigungen in Richtung der gemeinsamen Schwingungsachse keinen Einfluss auf die entlang der gemeinsamen Schwingungsachse erfolgende gegentaktige Bewegung der beiden Resonatoren.

Die Kopplung des ersten Resonators mit dem zweiten Resonator kann beispielsweise über ein Federsystem erfolgen, das den ersten Resonator mit dem zweiten Resonator verbindet. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den ersten Resonator mit dem zweiten Resonator über ein elektrostatisches Feld zu koppeln. Beide Kopplungen können allein oder in Kombination eingesetzt werden. Es ist ausreichend, wenn beispielsweise beide Resonatoren in einem gemeinsamen Substrat ausgebildet sind, so dass die mechanische Kopplung durch eine mechanische Verbindung ersetzt wird, die durch das gemeinsame Substrat selbst gegeben ist.

Die Ausgestaltungen des ersten und des zweiten Resonators sind vorzugsweise hinsichtlich Masse und Form identisch. In diesem Fall können die beiden Resonatoren achsensymmetrisch zueinander angeordnet sein bezüglich einer Symmetrieachse, die senkrecht auf der gemeinsamen Schwingungsachse steht, d. h. der erste Resonator wird durch die Symmetrieachse auf den zweiten Resonator abgebildet. Die Erfindung ist jedoch nicht hierauf beschränkt, es ist ausreichend, wenn die beiden Resonatoren die gleiche Masse aufweisen, in ihrer Form jedoch unterschiedlich ausgestaltet sind.

Wie bereits erwähnt, sind die gekoppelten Resonatoren derart ausgestaltet, dass beide linearen Schwinger eines Resonators entlang einer ersten Schwingungsachse im Gegentakt in Schwingung versetzbar sind (Anregungsschwingung), und der zweite lineare Schwinger zusätzlich entlang einer zweiten Schwingungsachse in Schwingung versetzt werden kann (Ausleseschwingung). Wenn die erste und die zweite Schwingungsachse senkrecht aufeinander stehen, und beiden Resonatoren entlang der ersten Schwingungsachse (gemeinsame Schwingungsachse) gegentaktig zueinander in

Schwingung versetzt werden, so werden die zweiten Schwinger bei Drehung des Corioliskreisels in entgegengesetzter Richtung ausgelenkt (Gegentakt-Auslenkung), wohingegen bei einer Beschleunigung des Corioliskreisels die zweiten linearen Schwinger in der gleichen Richtung ausgelenkt werden (Gleichtakt-Auslenkung). Damit ist es möglich, wahlweise Beschleunigungen oder

Drehungen zu messen. Durch Auswertung eines Gleichtaktes wird die Beschleunigung, durch Auswertung eines Gegentaktes die Drehrate gemessen. Mit den Begriffen "Gleichtakt" und "Gegentakt" ist Folgendes gemeint: Bezeichnet man die Koordinaten in Anregungsrichtung mit x und in Ausleserichtung mit y , dann gilt für den Gleichtakt $x_1 = x_2$, $y_1 = y_2$, und für den Gegentakt gilt: $x_1 = -x_2$, $y_1 = -y_2$ (hierbei bezeichnet der Index "1" den ersten Schwinger, und der Index "2" den zweiten Schwinger).

Die Erfindung stellt aus diesem Grunde ein Verfahren zur wahlweisen beziehungsweise gleichzeitigen Messung von Drehraten und Beschleunigungen bereit. Dieses Verfahren verwendet einen Drehraten-Corioliskreisel, der einen ersten und einen zweiten Resonator aufweist, die jeweils als gekoppeltes System aus einem ersten und einem zweiten linearen Schwinger ausgestaltet sind, und bei dem zu ermittelnde Drehraten durch Abgriff und Auswertung der Auslenkungen der zweiten Schwinger bestimmt werden. Das Verfahren weist die folgenden Schritte auf:

- Versetzen der beiden Resonatoren in zueinander gegentaktige Schwingungen entlang einer gemeinsamen Schwingungsachse, Vergleichen der Auslenkungen der zweiten Schwinger untereinander, um einen Gegentakt-Auslenkungsanteil, der ein Maß für die zu messende Drehrate ist, und/oder einen gemeinsamen Gleichtakt-Auslenkungsanteil, der ein Maß für die zu messenden Beschleunigung ist, zu ermitteln, und
- Berechnen der zu messenden Drehrate/Beschleunigung aus dem Gegentakt-Auslenkungsanteil/Gleichtakt-Auslenkungsanteil.

Der gemeinsame Gleichtakt-Auslenkungsanteil wird vorteilhafterweise wie folgt ermittelt: Es wird ein erster Quadraturbias, der innerhalb des ersten Resonators auftritt, und ein zweiter Quadraturbias, der innerhalb des zweiten Resonators auftritt, bestimmt. Dann werden der erste und der zweite Quadraturbias addiert und subtrahiert, um einen gemeinsamen Quadraturbiasanteil (Gleichtaktanteil) und einen Unterschieds-Quadraturbiasanteil (Gegentaktanteil) zu bestimmen. Der gemeinsame Quadraturbiasanteil ist der zu messenden Beschleunigung proportional und entspricht dem gemeinsamen Gleichtakt-Auslenkungsanteil. Der Unterschieds-Quadraturbiasanteil (Differenz) entspricht dem Gegentakt-Auslen-

kungsanteil. Damit kann über den Unterschieds-Quadraturbiasanteil gleichzeitig zur Beschleunigung die Drehrate gemessen werden.

5 Zum besseren Verständnis des vorangehend beschriebenen Beschleunigungs-Messprinzips sei in der folgenden Beschreibung nochmals kurz auf die physikalischen Grundlagen eines Corioliskreisels anhand des Beispiels eines linearen Doppelschwingersystems eingegangen.

10 Corioliskreisel weisen im Allgemeinen einen Quadraturbias, d. h. einen Nullpunktfehler auf. Der Quadraturbias setzt sich hierbei aus mehreren Quadraturbias-Anteilen zusammen. Einer dieser Quadraturbias-Anteile entsteht aufgrund von Fehlausrichtungen des ersten und zweiten linearen Schwingers zueinander, die aufgrund von Fertigungstoleranzen unvermeidlich sind. Die Fehlausrichtungen der beiden Schwinger zueinander erzeugen einen
15 Nullpunktfehler im gemessenen Drehratensignal.

Die Corioliskraft lässt sich darstellen als:

$$\vec{F} = 2m\vec{v}_s \times \vec{\Omega} \quad (1)$$

20

\vec{F} Corioliskraft

m Masse des Schwingers

\vec{v}_s Geschwindigkeit des Schwingers

$\vec{\Omega}$ Drehrate

25

Ist die auf die Corioliskraft reagierende Masse gleich der schwingenden Masse und wird der Schwinger mit der Eigenfrequenz ω betrieben, so gilt:

$$2m\vec{v}_s \times \vec{\Omega} = m\vec{a}_c \quad (2)$$

30 Für die Schwingergeschwindigkeit gilt:

$$\vec{v}_s = \vec{v}_{s0} \sin \omega t \quad (3)$$

mit

\vec{v}_{s0} Schwingeramplitude

35

ω Eigenfrequenz des Schwingers

Somit gilt für die Schwinger- und Coriolisbeschleunigungen:

$$\begin{aligned}\vec{a}_s &= \vec{v}_{s0} \omega \cos \omega t \\ \vec{a}_c &= 2\vec{v}_{s0} \sin \omega t \times \vec{\Omega}\end{aligned}\quad (4)$$

5

Damit stehen die beiden Beschleunigungsvektoren räumlich senkrecht aufeinander und sind in der Zeitfunktion um 90° gegeneinander versetzt (räumliche und zeitliche Orthogonalität).

10

Diese beiden Kriterien können benutzt werden, um die Schwingerbeschleunigung \vec{a}_s von der Coriolisbeschleunigung \vec{a}_c zu trennen. Das Verhältnis der o. g. Beschleunigungsamplituden a_c und a_s beträgt:

$$\frac{a_c}{a_s} = \frac{2\Omega}{\omega}\quad (5)$$

15

Für eine Drehrate $\Omega = 5^\circ/\text{h}$ und eine Eigenfrequenz des Schwingers $f_s = 10 \text{ KHz}$ ergibt sich:

$$\frac{a_c}{a_s} = 7,7 \cdot 10^{-10}\quad (6)$$

20

Für eine Genauigkeit von $5^\circ/\text{h}$ dürfen unerwünschte Kopplungen des ersten Schwingers auf den zweiten Schwinger höchstens $7,7 \cdot 10^{-10}$ betragen oder auf diesem Wert konstant sein. Verwendet man ein Massensystem aus zwei linearen Schwingern, die über Federelemente miteinander gekoppelt sind, so ist die Genauigkeit der räumlichen Orthogonalität aufgrund der Fehlausrichtung der Federelemente zwischen Schwing- und Messmode begrenzt. Die erreichbare Genauigkeit (durch Fertigungstoleranzen begrenzt) beträgt 10^{-3} bis 10^{-4} . Die Genauigkeit der zeitlichen Orthogonalität wird durch die Phasengenauigkeit der Elektronik bei z. Bsp. 10 KHz begrenzt, die ebenfalls nur auf höchstens 10^{-3} bis 10^{-4} einzuhalten ist. Daraus folgt, dass das oben definierte Verhältnis der Beschleunigungen nicht eingehalten werden kann.

25

30

Realistisch ergibt sich ein Fehler des gemessenen Beschleunigungsverhältnisses a_c/a_s von

35

$$\frac{a_c}{a_s} = 10^{-6} \text{ bis } 10^{-8} \quad (7)$$

Der räumliche Fehler resultiert in einem sogenannten Quadraturbias B_Q , der mit dem zeitlichen Phasenfehler Δ_φ einen Bias B ergibt:

$$B_Q = 6,5 \cdot 10^6 \text{ }^\circ/\text{h} \text{ bis } 6,5 \cdot 10^5 \text{ }^\circ/\text{h}$$

$$\Delta_\varphi = 10^{-3} \text{ bis } 10^{-4} \quad (8)$$

$$B = B_Q \cdot \Delta_\varphi = 6.500 \text{ }^\circ/\text{h} \text{ bis } 65 \text{ }^\circ/\text{h}$$

Somit bewirkt der Quadraturbias eine starke Einschränkung der Messgenauigkeit. Dabei ist anzumerken, dass o. g. Fehlerbetrachtung nur die direkte Kopplung vom Schwing- in den Auslesemode berücksichtigt. Es existieren noch weitere Quadraturbiasanteile, die beispielsweise durch Kopplungen mit anderen Schwingungsmoden entstehen.

Wenn der Corioliskreisel derart ausgestaltet ist, dass die ersten Schwinger durch erste Federelemente mit einem Kreisrahmen des Corioliskreisels verbunden, und die zweiten Schwinger durch zweite Federelemente jeweils mit einem der ersten Schwinger verbunden sind, so bewirkt die zu messende Beschleunigung eine Änderung der gegenseitigen Ausrichtung der ersten Schwinger zu den zweiten Schwingern, die sich insbesondere in einer Änderung der Ausrichtung der zweiten Federelemente manifestiert. Die Ausrichtungsänderung der zweiten Federelemente erzeugt hierbei einen "künstlichen" Quadraturbias-Anteil, d.h. einen "Fehler" im Quadraturbias-Signal. Somit kann über die Bestimmung des Quadraturbias indirekt auch auf die zu messende Beschleunigung geschlossen werden, die den entsprechenden "künstlichen" Quadraturbias-Anteil bewirkt hat.

Die Ausrichtungen der ersten und zweiten Federelemente verlaufen vorzugsweise senkrecht zueinander. Die Federelemente können eine beliebige Form aufweisen.

Unter "erster Quadraturbias" und "zweiter Quadraturbias" wird vorzugsweise jeweils der gesamte Quadraturbias eines Resonators verstanden. Es ist jedoch auch möglich, im erfindungsgemäßen Beschleunigungsmeßverfahren in jedem Resonator jeweils nur einen Quadraturbiasanteil zu ermitteln, wobei der ermittelte Quadraturbiasanteil zumindest den durch die zu messende Beschleunigung bzw. zu messende Drehung bewirkten Anteil enthalten muss.

Der Corioliskreisel weist vorzugsweise eine Einrichtung zur Ermittlung erster Drehraten- und Quadraturbiassignale, die innerhalb des ersten Resonators auftreten, und zweiter Drehraten- und Quadraturbiassignale, die innerhalb des zweiten Resonators auftreten, auf. Der Corioliskreisel kann ferner eine Einrichtung zur Erzeugung elektrostatischer Felder aufweisen, durch die ein Ausrichtungswinkel der ersten Federelemente bezüglich des Kreiselrahmens änderbar und/oder ein Ausrichtungswinkel der zweiten Federelemente bezüglich der ersten Schwinger änderbar ist. Durch Vorsehen entsprechender Regelkreise kann dann die Ausrichtung/Stärke der elektrostatischen Felder so geregelt werden, dass der erste und der zweite Quadraturbias jeweils möglichst klein wird. Mittels einer Recheneinheit kann aus den ersten und zweiten Drehraten-/Quadraturbiassignalen die Drehrate ermittelt und aus einem Gleichtaktanteil der elektrostatischen Felder, die den ersten und zweiten Quadraturbias kompensieren, auf die zu messende Beschleunigung geschlossen werden.

Der Quadraturbias wird vorzugsweise also am Entstehungsort selbst eliminiert, d. h. mechanische Fehlausrichtungen der beiden Schwinger zueinander sowie durch die zu messende Beschleunigung/Drehung bewirkte Änderungen der gegenseitigen Ausrichtung der beiden Schwinger werden durch eine elektrostatische Kraft, die auf einen oder beide Schwinger wirkt und durch das elektrostatische Feld erzeugt wird, kompensiert. Eine derartige Quadraturbias-Kompensation hat den Vorteil, dass sowohl Drehraten als auch Beschleunigungen mit einer erhöhten Messgenauigkeit ermittelt werden können.

In einer besonders bevorzugten Ausführungsform werden durch die elektrischen Felder die Ausrichtungswinkel der ersten und zweiten Federelemente so geändert, dass eine Orthogonalisierung der Ausrichtungen der ersten und zweiten Federelemente zueinander bewirkt wird. Ist eine derartige Orthogonalisierung erreicht, so ist der dadurch erzeugte Quadraturbias(anteil) kompensiert. Bei weiteren Beiträgen zum Quadraturbias wird der Fehlwinkel zur Orthogonalität so eingestellt, dass der gesamte Quadraturbias verschwindet. Vorzugsweise werden die Ausrichtungswinkel der zweiten Federelemente bezüglich des ersten Schwingers durch das elektrostatische Feld geändert, und die Ausrichtungswinkel der ersten Federelemente bezüglich des Kreiselrahmens des Corioliskreisels nicht geändert. Es ist jedoch auch möglich, durch das elektrostatische Feld lediglich die Ausrichtungswinkel der ersten Federelemente zu ändern, oder die Ausrichtungswinkel sowohl der ersten als auch der zweiten Federelemente zu ändern.

Eine besonders bevorzugte Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Corioliskreisels weist:

- einen ("Gesamt"-) Resonator, der als System aus zwei gekoppelten ersten (linearen) Schwingern ("Sub-Resonatoren") realisiert ist, die im Gegentakt erregt werden und die jeweils einen zweiten linearen Ausleseschwinger enthalten,
- eine Einrichtung zur Erzeugung wenigstens eines elektrostatischen Felds, durch das die Ausrichtung der beiden gekoppelten ersten Schwinger zu den zweiten (Auslese-) Schwingern änderbar ist,
- eine Einrichtung zur Ermittlung der Quadraturbiasse der Ausleseschwinger, die durch Fehlauseinandersetzungen der beiden Schwinger zum Erregungsschwinger und weiteren Kopplungsmechanismen verursacht werden,
- einen Regelkreis, der die Stärke des wenigstens einen elektrostatischen Felds mittels wenigstens eines entsprechenden Regelsignals jeweils so regelt, dass die ermittelten Quadraturbiasse möglichst klein werden,
- eine Recheneinheit, die jeweils Differenzen und Summen des wenigstens einen Regelsignals bildet und daraus die Drehrate und die Beschleunigung ermittelt, auf.

Prinzipiell ist es möglich, Beschleunigungen bzw. Drehraten nur auf Basis der ermittelten Quadraturbiasse zu berechnen, d.h. für eine Ermittlung der Quadraturbiasse ist eine Kompensation des ersten und zweiten Quadraturbias nicht zwingend notwendig. Aufgrund von Messgenauigkeitsgründen ist dies jedoch ratsam, da wegen Phasentoleranzen Drehrate und Quadratur miteinander vermischt sind. Die Erfindung beinhaltet beide Alternativen.

25

Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, in den Resonatoren jeweils den zweiten Schwinger am ersten Schwinger "einseitig" zu befestigen bzw. einzuspannen. "Einseitig eingespannt" kann hierbei sowohl wörtlich als auch in einem allgemeinen Sinn verstanden werden. Allgemein bedeutet "einseitig" befestigt bzw. eingespannt, dass die Krafteinleitung von dem ersten Schwinger auf den zweiten Schwinger im Wesentlichen von einer "Seite" des ersten Schwingers aus erfolgt. Wäre der Aufbau des Schwingersystems beispielsweise derart, dass der zweite Schwinger durch den ersten Schwinger eingerahmt wird und mit diesem durch zweite Federelemente verbunden ist, so würde einseitig eingespannt bzw. befestigt folgendes implizieren: der zweite Schwinger wird der Bewegung des ersten Schwingers nachgeführt, indem der erste Schwinger den zweiten Schwinger mittels der zweiten Federelemente abwechselnd "schiebt" oder "zieht".

Ein einseitiges Einspannen des zweiten Schwingers am ersten Schwinger hat den Vorteil, dass bei Ausüben einer elektrostatischen Kraft auf den zweiten Schwinger aufgrund der dadurch resultierenden Ausrichtungs-/Positionsänderung des zweiten Schwingers die zweiten Federelemente leicht verbogen werden können und damit der entsprechende Ausrichtungswinkel der zweiten Federelemente problemlos geändert werden kann. Wäre in diesem Beispiel der zweite Schwinger an zusätzlichen zweiten Federelementen aufgehängt derart, dass bei einer Bewegung des ersten Schwingers der zweite Schwinger durch die zweiten Federelemente gleichzeitig "gezogen" und "geschoben" würde, so läge eine "zweiseitige" Einspannung bzw. Befestigung des zweiten Schwingers an dem ersten Schwinger vor (Krafteinleitung auf den zweiten Schwinger von zwei gegenüberliegenden Seiten des ersten Schwingers aus). In diesem Fall würden die zusätzlichen zweiten Federelemente bei Anlegen eines elektrostatischen Felds entsprechende Gegenkräfte erzeugen, so dass Änderungen der Ausrichtungswinkel der zweiten Federelemente nur schwer erzielbar wären. Eine zweiseitige Einspannung ist jedoch dann akzeptabel, wenn die zusätzlichen zweiten Federelemente so ausgelegt sind, dass der Einfluss dieser Federelemente gering ist und somit auch hier eine problemlose Verbiegung aller Federelemente erfolgen kann, also effektiv eine einseitige Einspannung vorliegt. Je nach Auslegung der Schwingerstruktur kann effektiv bereits eine einseitige Einspannung vorliegen, wenn der "Einfluss" (Krafteinleitung) der zusätzlichen zweiten Federelemente 40% oder weniger beträgt. Dieser Wert stellt jedoch keine Einschränkung der Erfindung dar, es ist auch denkbar dass der Einfluss der zweiten Federelemente mehr als 40% beträgt. Eine einseitige Einspannung kann beispielsweise dadurch realisiert werden, dass alle zweiten Federelemente, die den zweiten Schwinger mit dem ersten Schwinger verbinden, parallel und in einer Ebene zueinander angeordnet sind. Alle Anfangs- und Endpunkte der zweiten Federelemente sind jeweils an den gleichen Seiten des ersten bzw. zweiten Schwingers befestigt. Die Anfangs- und Endpunkte der zweiten Federelemente können dabei vorteilhafterweise jeweils auf einer gemeinsamen Achse liegen, wobei die Achsen die zweiten Federelemente im rechten Winkel schneiden.

Ist der zweite Schwinger einseitig am ersten Schwinger befestigt bzw. eingespannt, so sind die ersten Federelemente vorzugsweise so ausgestaltet, dass diese den ersten Schwinger am Kreisrahmen zweiseitig einspannen (die Begriffe "einseitig" und "zweiseitig" sind hier analog zu verwenden). Alternativ hierzu ist es jedoch möglich, auch die ersten Federelemente so auszugestalten, dass sie den ersten Schwinger einseitig einspannen. Beispielsweise können sämtliche erste Federelemente, die den ersten Schwinger mit dem Kreisrahmen des

Corioliskreisels verbinden, parallel und in einer Ebene zueinander angeordnet sein, wobei vorzugsweise die Anfangs- und Endpunkte der ersten Federelemente jeweils auf einer gemeinsamen Achse liegen. Genauso ist es möglich, die Federelemente so auszugestalten, dass der erste Schwinger am Kreisrahmen einseitig eingespannt ist, und der zweite Schwinger durch den ersten Schwinger zweiseitig eingespannt wird. Auch ist es möglich, beide Schwinger zweiseitig einzuspannen. Für die Quadraturbiaskompensation hat es sich als vorteilhaft erwiesen, wenigstens einen der beiden Schwinger einseitig einzuspannen.

- 10 Die Erfindung wird im Folgenden unter Bezugnahme auf die Figuren in beispielsweiser Ausführungsform näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 eine mögliche Ausführungsform eines aus zwei linearen Schwingern bestehenden Massensystems mit entsprechenden Regelkreisen, die der Anregung des ersten Schwingers dienen.

Fig. 2 eine mögliche Ausführungsform eines aus zwei linearen Schwingern bestehenden Massensystems mit entsprechenden Mess- und Regelkreisen für eine Drehrate Ω und einen Quadraturbias B_Q sowie Hilfsregelkreisen zur Kompensation des Quadraturbias B_Q .

Fig. 3 eine Prinzipskizze eines erfindungsgemäßen, aus vier linearen Schwingern bestehenden Massensystems mit entsprechenden Mess- und Regelkreisen für eine Drehrate Ω und einen Quadraturbias B_Q sowie den Hilfsregelkreisen zur Kompensation des Quadraturbias.

Fig. 4 eine bevorzugte Ausführungsform des in Fig. 3 gezeigten Regelsystems.

- 30 Fig. 1 zeigt den schematischen Aufbau eines linearen Doppelschwingers 1 mit entsprechenden Elektroden, sowie ein Blockschaltbild einer zugehörigen Auswerte-/Anregungselektronik 2. Der lineare Doppelschwinger 1 wird vorzugsweise mittels Ätzprozessen aus einer Siliziumscheibe hergestellt und weist einen ersten linearen Schwinger 3, einen zweiten linearen Schwinger 4, erste Federelemente 5₁ bis 5₄, zweite Federelemente 6₁ und 6₂ sowie Teile eines Zwischenrahmens 7₁ und 7₂ und eines Kreisrahmens 7₃ und 7₄ auf. Der zweite Schwinger 4 ist innerhalb des ersten Schwingers 3 schwingbar gelagert und mit diesem über die zweiten Federelemente 6₁, 6₂ verbunden. Der erste Schwinger 3

ist mit dem Kreisrahmen 7₃, 7₄ durch die ersten Federelemente 5₁ bis 5₄ und dem Zwischenrahmen 7₁, 7₂ verbunden.

Weiterhin sind erste Anregungselektroden 8₁ bis 8₄, erste Ausleseelektroden 9₁ bis 9₄, zweite Anregungselektroden 10₁ bis 10₄ sowie zweite Ausleseelektroden 11₁ und 11₂ vorgesehen. Sämtliche Elektroden sind mit dem Kreisrahmen mechanisch verbunden, aber elektrisch isoliert. Unter "Kreisrahmen" wird eine mechanische, nicht-schwingende Struktur verstanden, in der die Schwinger "eingebettet" sind, beispielsweise der nicht-schwingende Teil der Siliziumscheibe.

Wird der erste Schwinger 3 mittels der ersten Anregungselektroden 8₁ bis 8₄ zu einer Schwingung in X1-Richtung angeregt, so wird diese Bewegung durch die zweiten Federelemente 6₁, 6₂ auf den zweiten Schwinger 4 übertragen (abwechselndes "Ziehen" und "Schieben"). Durch die vertikale Ausrichtung der ersten Federelemente 5₁ bis 5₄ ist dem ersten Schwinger 3 eine Bewegung in der X2-Richtung verwehrt. Eine vertikale Schwingung kann jedoch aufgrund der horizontalen Ausrichtung der zweiten Federelemente 6₁, 6₂ durch den zweiten Schwinger 4 ausgeführt werden. Treten demnach entsprechende Corioliskräfte auf, so wird der zweite Schwinger 4 zu Schwingungen in der X2-Richtung angeregt.

Ein von den ersten Ausleseelektroden 9₁ bis 9₄ ausgelesenes, der Amplitude/Frequenz der X1-Bewegung des ersten Schwingers 3 proportionales Auslesesignal wird über entsprechende Verstärkerelemente 21, 22, und 23 einem Analog/Digital-Wandler 24 zugeführt. Ein entsprechend digitalisiertes Ausgangssignal des Analog/Digital-Wandlers 24 wird sowohl durch einen ersten Demodulator 25 und durch einen zweiten Demodulator 26 in entsprechende Ausgangssignale demoduliert, wobei die beiden Demodulatoren um 90° versetzt zueinander arbeiten. Das Ausgangssignal des ersten Demodulators 25 wird einem ersten Regler 27 zur Regelung der Frequenz der Anregungsschwingung (Schwingung des Massensystems 1 in X1-Richtung) zugeführt, dessen Ausgangssignal einen Frequenzgenerator 30 so steuert, dass das nach dem Demodulator 25 auftretende Signal auf Null geregelt wird. Analog hierzu wird das Ausgangssignal des zweiten Demodulators 26 auf einen konstanten Wert geregelt, der von der Elektronikkomponente 29 vorgegeben wird. Ein zweiter Regler 31 sorgt für die Regelung der Amplitude der Anregungsschwingung. Die Ausgangssignale des Frequenzgenerators 30 und des Amplitudenreglers 31 werden durch einen Multiplizierer 32 miteinander multipliziert. Ein Ausgangssignal des Multiplizierers 32, das auf die ersten

Anregungselektroden 8₁ bis 8₄ zu gebenden Kraft proportional ist, beaufschlagt sowohl einen ersten Kraft-Spannungswandler 33 als auch einen zweiten Kraft-Spannungswandler 34, die aus dem digitalen Kraftsignal digitale Spannungssignale erzeugen. Die digitalen Ausgangssignale der Kraft-Spannungswandler 33, 34 werden über einen ersten und einen zweiten Digital/Analog-Wandler 35, 36 in entsprechende analoge Spannungssignale umgesetzt, die dann auf die ersten Anregungselektroden 8₁ bis 8₄ gegeben werden. Durch den ersten Regler 27 und den zweiten Regler 31 werden die Frequenz der Eigenfrequenz des ersten Schwingers 3 nachgeführt und die Amplitude der Anregungsschwingung auf einen bestimmten, vorgebbaren Wert eingestellt.

Treten Corioliskräfte auf, so wird die daraus resultierende Bewegung des zweiten Schwingers 4 in X2-Richtung (Ausleseschwingung) durch die zweiten Ausleseelektroden 11₁, 11₂ erfasst und ein der Bewegung der Ausleseschwingung proportionales Auslesesignal über entsprechende Verstärkerelemente 40, 41, und 42 einem Analog/Digital-Umwandler 43 zugeführt (siehe Fig. 2). Ein digitales Ausgangssignal des Analog/Digital-Umwandlers 43 wird von einem dritten Demodulator 44 in Phase mit dem Direktbiassignal demoduliert, und durch einen vierten Demodulator 45 um 90° versetzt demoduliert. Ein entsprechendes Ausgangssignal des ersten Demodulators 44 beaufschlagt einen dritten Regler 46, dessen Ausgangssignal ein Kompensationssignal ist und der zu messenden Drehrate Ω entspricht. Ein Ausgangssignal des vierten Demodulators 45 beaufschlagt einen vierten Regler 47, dessen Ausgangssignal ein Kompensationssignal ist und dem zu kompensierenden Quadraturbias proportional ist. Das Ausgangssignal des dritten Reglers wird mittels eines ersten Modulators 48 moduliert, analog hierzu wird das Ausgangssignal des vierten Reglers 47 durch einen zweiten Modulator 49 moduliert, sodass amplitudengeregelte Signale entstehen, deren Frequenz der Eigenfrequenz der Schwingung in X1-Richtung ($\sin \cong 0^\circ$, $\cos \cong 90^\circ$) entsprechen. Entsprechende Ausgangssignale der Modulatoren 48, 49 werden in einer Addierstufe 50 addiert, deren Ausgangssignal sowohl einem dritten Kraft-Spannungswandler 51 als auch einem vierten Kraft-Spannungswandler 52 zugeführt wird. Die entsprechenden Ausgangssignale der Kraft-Spannungswandler 51, 52 werden Digital/Analog-Umwandlern 53, 54 zugeführt, wobei deren analoge Ausgangssignale die zweiten Anregungselektroden 10₂ bis 10₃ beaufschlagen und die Schwingungsamplituden des zweiten Schwingers 4 rückstellen.

Das durch die zweiten Anregungselektroden 10₁ und 10₄ erzeugte elektrostatische Feld (bzw. die beiden durch die Elektrodenpaare 10₁, 10₃ und 10₂, 10₄ erzeugten

elektrostatischen Felder) bewirkt eine Ausrichtungs-/Positionsänderung des zweiten Schwingers 4 in der X2-Richtung und damit eine Änderung der Ausrichtungen der zweiten Federelemente 6₁ bis 6₂. Der vierte Regler 47 regelt das die zweiten Anregungselektroden 10₁ und 10₄ beaufschlagende Signal derart, dass
5 der Quadraturbias, der im Kompensationssignal des vierten Reglers 47 enthalten ist, möglichst klein wird bzw. verschwindet. Dazu wird ein fünfter Regler 55, ein fünfter und sechster Kraft-Spannungswandler 56, 57 und zwei Analog/Digital-Umwandler 58, 59 eingesetzt.

10 Das Ausgangssignal des vierten Reglers 47, das ein Maß für den Quadraturbias ist, wird dem fünften Regler 55 zugeführt, der das durch die beiden Anregungselektroden 10₁ und 10₄ erzeugte elektrostatische Feld so regelt, dass der Quadraturbias B_Q verschwindet. Dazu wird ein Ausgangssignal des fünften
15 Reglers 55 jeweils dem fünften und sechsten Kraft-Spannungswandler 56, 57 zugeführt, die aus dem digitalen Kraft-Ausgangssignal des fünften Reglers digitale Spannungssignale erzeugen. Diese werden anschließend in den Analog/Digital-Umwandlern 58, 59 in analoge Spannungssignale umgewandelt. Das analoge Ausgangssignal des Analog/Digital-Umwandlers 58 wird der zweiten Anregungselektrode 10₁ oder alternativ 11₁ zugeführt. Das analoge
20 Ausgangssignal des Analog/Digital-Umwandlers 59 wird der zweiten Anregungselektrode 10₄ oder alternativ 11₂ zugeführt.

Da die Einspannung des zweiten Schwingers 4 lediglich durch die zweiten Federelemente 6₁ bis 6₂ bewirkt wird (einseitige Einspannung), kann die
25 Ausrichtung dieser Federelemente durch das elektrostatische Feld problemlos geändert werden. Weiterhin ist es möglich, zusätzliche zweite Federelemente vorzusehen, die eine zweiseitige Einspannung des zweiten Schwingers 4 bewirken, solange durch entsprechende Auslegung dieser zusätzlichen Federelemente sichergestellt ist, dass effektiv eine einseitige Einspannung erzielt wird. Um
30 denselben Effekt auch für die Federelemente 5₁, 5₂ bzw. die Federelemente 5₃, 5₄ zu ermöglichen, können das dritte und vierte Federelement 5₃, 5₄ bzw. das erste und zweite Federelement 5₁, 5₂ weggelassen werden und damit (zusammen mit einer hier nicht gezeigten, entsprechend geänderten Elektrodenkonfiguration) eine einseitige Einspannung des ersten Schwingers 3 bewirkt werden. In einem
35 derartigen Fall könnte der zweite Schwinger 4 auch mit weiteren Federelementen am ersten Schwinger befestigt werden, um eine zweiseitige Einspannung zu erzielen.

In der folgenden Beschreibung soll unter Bezugnahme auf Fig. 3 eine bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Corioliskreisels sowie dessen Funktionsweise näher beschrieben werden.

5 Fig. 3 zeigt den schematischen Aufbau eines gekoppelten Systems 1' aus einem ersten Resonator 70₁ und einem zweiten Resonator 70₂. Der erste Resonator 70₁ ist mit dem zweiten Resonator 70₂ über ein mechanischen Kopplungselement 71, eine Feder, gekoppelt. Der erste und der zweite Resonator 70₁, 70₂ sind in einem
10 gemeinsamen Substrat ausgebildet und können entlang einer gemeinsamen Schwingungsachse 72 gegentaktig zueinander in Schwingung versetzt werden. Der erste und der zweite Resonator 70₁, 70₂ sind identisch und werden über eine Symmetrieachse 73 aufeinander abgebildet. Der Aufbau des ersten und des zweiten Resonators 70₁, 70₂ wurde bereits im Zusammenhang mit Fig. 1 und 2
15 erläutert und wird deshalb nicht nochmals erklärt; identische bzw. einander entsprechende Bauteile bzw. Bauteilgruppen sind mit den gleichen Bezugsziffern gekennzeichnet, wobei identische Bauteile, die unterschiedlichen Resonatoren angehören, mit unterschiedlichen Indices gekennzeichnet sind.

20 Ein wesentlicher Unterschied der in Fig. 3 gezeigten Doppelschwinger zu den in den Fig. 1 und 2 gezeigten Doppelschwinger ist, dass einige der Einzelelektroden konstruktiv zu einer Gesamtelektrode zusammengefasst werden. So bilden beispielsweise die mit den Bezugsziffern 8₁, 8₂, 9₁ und 9₂ gekennzeichneten Einzelelektroden in Fig. 3 eine gemeinsame Elektrode. Weiterhin bilden die mit den Bezugsziffern 8₃, 8₄, 9₃ und 9₄ gekennzeichneten Einzelelektroden eine
25 gemeinsame Elektrode, und die mit den Bezugsziffern 10₄, 10₂, 11₂ sowie den Bezugsziffern 11₁, 10₃ und 10₁ jeweils eine Gesamtelektrode. Das Gleiche gilt analog für das andere Doppelschwingersystem.

30 Bei Betrieb des erfindungsgemäßen gekoppelten Systems 1' schwingen die beiden Resonatoren 70₁, 70₂ entlang der gemeinsamen Schwingungsachse 72 im Gegentakt. Damit ist das gekoppelte System 1' unanfällig gegenüber externen Störungen bzw. gegenüber Störungen, die durch das gekoppelte System 1' selbst in das Substrat, in dem die Resonatoren 70₁ und 70₂ gelagert sind, abgegeben werden.

35 Wenn das gekoppelte System 1' gedreht wird, so werden die zweiten Schwinger 4₁ und 4₂ in zueinander entgegengesetzte Richtungen ausgelenkt (in X2-Richtung und entgegengesetzt zur X2-Richtung). Tritt eine Beschleunigung des gekoppelten Systems 1' auf, so werden die zweiten Schwinger 4₁, 4₂ jeweils in die gleiche

Richtung, nämlich in Richtung der Beschleunigung, ausgelenkt, insofern diese in oder entgegengesetzt der X2-Richtung wirkt. Somit lassen sich gleichzeitig oder wahlweise Beschleunigungen und Drehungen messen. Während den Messverfahren kann gleichzeitig eine Quadraturbias-Kompensation in den Resonatoren 70₁, 70₂ erfolgen. Dies ist jedoch nicht zwingend erforderlich.

Prinzipiell ist es möglich, das gekoppelte System 1' auf Basis der in Fig. 1 und 2 beschriebenen Auswerte-/Anregungselektronik 2 zu betreiben. In der in Fig. 3 gezeigten Ausführungsform wird jedoch stattdessen ein alternatives Verfahren (Trägerfrequenzverfahren) eingesetzt. Dieses Betriebsverfahren soll im Folgenden beschrieben werden.

Die mit Bezugsziffer 2' gekennzeichnete Auswerte-/Anregungselektronik 2 weist drei Regelkreise auf: Einen ersten Regelkreis zur Anregung bzw. Regelung einer Gegentaktschwingung der ersten Schwinger 3₁ und 3₂ entlang der gemeinsamen Schwingungsachse 72, einen zweiten Regelkreis zur Rückstellung und Kompensation der Schwingungen des zweiten Schwingers 4₁ entlang der X2-Richtung, und einen Regelkreis zur Rückstellung und Kompensation der Schwingungen des zweiten Schwingers 4₂ entlang der X2-Richtung. Die beschriebenen drei Regelkreise weisen einen Verstärker 60, einen Analog/Digital-Umwandler 61, ein Signaltrennungsmodul 62, ein erstes bis drittes Demodulationsmodul 63₁ bis 63₃, ein Regelmodul 64, ein Elektrodenspannungsberechnungsmodul 65, ein Trägerfrequenz-Additionsmodul 67, sowie einen ersten bis sechsten Digital/Analog-Umwandler 66₁ bis 66₆ auf.

Die Beaufschlagung der Elektroden 8₁ bis 8₈, 9₁ bis 9₈, 10₁ bis 10₈ sowie 11₁ bis 11₄ mit Trägerfrequenzen zur Abgriffserregung der Gegentaktschwingung bzw. der Schwingungen der zweiten Schwinger 4₁, 4₂ kann hierbei auf mehrerlei Art und Weise erfolgen: a) Unter Verwendung von drei unterschiedlichen Frequenzen, wobei jedem Regelkreis eine Frequenz zugeordnet ist, b) unter Verwendung von Rechtecksignalen im Zeitmultiplex-Verfahren, oder c) unter Verwendung einer Random-Phasen-Verwürfelung (stochastisches Modulationsverfahren). Die Beaufschlagung der Elektroden 8₁ bis 8₈, 9₁ bis 9₈, 10₁ bis 10₈ sowie 11₁ bis 11₄ erfolgt über die zusammengehörigen Signale UyAo, UyAu (für den zweiten Schwinger 4₁) und Uxl, Uxr (für die Gegentaktresonanz der ersten Schwinger 3₁ zu 3₂), sowie UyBu und UyBo (für den zweiten Schwinger 4₂), die in dem Trägerfrequenz-Additionsmodul 67 erzeugt und in Gegentakt mit o.g. Frequenzsignalen erregt werden. Der Abgriff der Schwingungen der ersten und zweiten Schwinger 3₁, 3₂, 4₁ und 4₂ erfolgt über die mit Bezugsziffern 77, 79, 711

und 7₁₃ gekennzeichneten Teile des Kreiselrahmens, die hier neben ihrer Funktion als Aufhängepunkte des Massensystems zusätzlich als Abgriffselektroden dienen. Dazu sind die beiden Resonatoren 70₁, 70₂ vorzugsweise mit allen Rahmen, Federn und Verbindungen vorteilhafterweise elektrisch leitend ausgestaltet. Das durch die Kreiselrahmen-Teile 7₇, 7₉, 7₁₁ und 7₁₃ abgegriffene, dem Verstärker 60 zugeführte Signal enthält Information über alle drei Schwingungsmoden und wird durch den Analog/Digital-Umwandler 61 in ein digitales Signal umgewandelt, das dem Signaltrennungsmodul 62 zugeführt wird. In dem Signaltrennungsmodul 62 wird das zusammengesetzte Signal in drei unterschiedliche Signale getrennt: x (enthält Information über die Gegentaktschwingung), yA (enthält Information über die Auslenkung des zweiten Schwingers 4₁), sowie yB (enthält Information über die Auslenkung des zweiten Schwingers 4₂). Die Signaltrennung gestaltet sich je nach Typ des verwendeten Trägerfrequenzverfahrens (siehe oben a) bis c)) unterschiedlich, und erfolgt durch Demodulation mit den entsprechenden Signalen des verwendeten Trägerfrequenzverfahrens. Die Signale x, yA, sowie yB werden den Demodulationsmodulen 63₁ bis 63₃ zugeführt, die diese mit einer Arbeitsfrequenz der Gegentaktschwingung für 0° und 90° demodulieren. Das Regelmodul 64 sowie das Elektrodenspannungs-Berechnungsmodul 65 zur Regelung/Berechnung der Signale F_{x1/r} bzw. U_{x1/r} sind vorzugsweise analog zu dem in Fig. 1 gezeigten Elektronikmodul 2 ausgestaltet. Das Regelmodul 64 sowie das Elektrodenspannungs-Berechnungsmodul 65 zur Regelung/Berechnung der Signale F_{yAo/u}, U_{yAo/u}, sowie F_{yBo/u}, U_{yBo/u} sind vorzugsweise analog zu dem in Fig. 2 gezeigten Elektronikmodul 2 ausgestaltet.

Fig. 4 zeigt eine bevorzugte Ausführungsform des mit Bezugsziffer 64 gekennzeichneten Regelsystems aus Fig. 3. Das Regelsystem 64 weist einen ersten bis dritten Teil 64₁ bis 64₃ auf. Der erste Teil 64₁ weist einen ersten Regler 80, einen Frequenzgenerator 81, einen zweiten Regler 82, eine Elektronikkomponente 83, eine Addierstufe 84, und einen Multiplizierer 85 auf. Die Funktionsweise des ersten Teils entspricht im Wesentlichen der Funktionsweise des in Fig. 1 gezeigten Elektronikmoduls 2 und wird deshalb hier nicht nochmals erläutert. Der zweite Teil 64₂ weist einen ersten Regler 90, einen ersten Modulator 91, einen zweiten Regler 92, einen zweiten Modulator 93 und einen dritten Regler 94 auf. Ferner sind eine erste und eine zweite Addierstufe 95, 96 vorgesehen. Am Ausgang des ersten Reglers 90 kann ein Drehratensignal Ω , und am Ausgang des dritten Reglers 94 kann ein zusammengesetztes Signal aus einem Quadraturbias B_Q und einer Beschleunigung A ermittelt werden. Der dritte Teil 64₃ des Regelsystems 64 weist einen ersten Regler 100, einen ersten Modulator 101, einen zweiten Regler 102, einen zweiten Modulator 103 und einen dritten Regler 104 auf. Weiterhin

sind eine erste und eine zweite Addierstufe 105, 106 vorgesehen. Am Ausgang des ersten Reglers 100 kann ein Drehratensignal Ω mit negativem Vorzeichen abgegriffen werden, und am Ausgang des dritten Reglers 104 ein zusammengesetztes Signal aus dem Quadraturbias B_Q mit negativem Vorzeichen und einem Beschleunigungssignal A. Die Funktionsweise des zweiten und dritten Teils 64₂ und 64₃ entspricht der des in Fig. 2 gezeigten Elektronikmoduls 2 und wird deshalb hier nicht nochmals erläutert.

Nur die Signale für die Rückstellung der Drehrate und der Quadratur nach der Multiplikation mit der Arbeitsfrequenz werden zusammen mit den DC-Spannungen für den Quadratur-Hilfsregler auf ein zusammengefasstes Elektrodenpaar gegeben. Deshalb werden beide Signale addiert, so dass die Berechnung der Elektrodenspannungen die Rückstellsignale bei der Schwingfrequenz und das DC-Signal für die Quadraturregelung enthält. Die so berechneten Elektrodenspannungen $U_{x1/r}$, $U_{yA0/u}$ und $U_{yB0/u}$ werden dann zu den Trägerfrequenz-Signalen addiert und gemeinsam über die Analog/Digital-Umwandler 66₁ bis 66₆ auf die Elektroden gegeben.

Die oben beschriebenen Trägerfrequenzverfahren mit Gegentakterregung haben den Vorteil, dass an dem Verstärker 60 nur dann ein Signal anliegt, wenn die linearen Schwinger 3₁, 3₂ sowie 4₁ und 4₂ ausgelenkt sind. Die zur Erregung dienenden Frequenzsignale können diskrete Frequenzen oder rechteckige Signale sein. Wegen der leichteren Erzeugung und Verarbeitung werden Rechteckerregungen bevorzugt.

Im Folgenden sollen noch einige Betrachtungen zur Messgenauigkeit des erfindungsgemäßen Beschleunigungs-Messverfahrens gegeben werden.

Die Drehrate bewirkt eine Gegentakt-Auslenkung der Schwinger 4₁ und 4₂ bei der Arbeitsfrequenz des Corioliskreisels; dagegen bewirkt die Beschleunigung eine Gleichtakt-Auslenkung der Schwinger 4₁ und 4₂, wobei die Beschleunigung im Frequenzgebiet von 0 Hz bis ca. 500 Hz mit einer Messgenauigkeit von 50 mg bis 50 μ g zu messen ist.

Die zu messende Auslenkung im Gleichtakt ergibt sich zu

$$\alpha = \frac{a}{l \cdot \omega^2}$$

α	Auslenkungswinkel
a	Beschleunigung
ℓ	Länge der Feder
ω	Eigenfrequenz der Schwinger 4 ₁ bis 4 ₂ .

5

Für typische Eigenfrequenzen $\omega = 2 \cdot \pi f = 6000 \text{ rad/s}$ bis 60000 rad/s und Federlängen $\ell = 1 \text{ mm}$ von Corioliskreiseln ergibt sich für eine Messgenauigkeit von z. B. 5 mg:

10

$$\alpha = 1.4 \cdot 10^{-6} \text{ bis } 1.4 \cdot 10^{-8} \text{ rad bzw. } x_2 = x_t = 1.4 \text{ nm bis } 14 \text{ pm.}$$

15

Solche geringen Auslenkungen lassen sich im Frequenzgebiet von 0 bis 500 Hz-Bereich schwer messen. Zumindest erfordert es einen elektronischen Zusatzaufwand für den erfindungsgemäßen Multisensor, weil die Elektronik sowohl im Arbeitsbereich der Kreiselfunktion (Drehratenmessung) von 1 bis 10 KHz als auch im Arbeitsbereich zur Messung der Beschleunigung von 0 bis 500 Hz sehr genau messen muss.

20

Dieser Nachteil lässt sich erfindungsgemäß dadurch vermeiden, dass man die oben beschriebene Quadraturregelung für ein Massensystem aus zwei linearen Schwingern (Fig 1 und 2) auf das Massesystem aus vier linearen Schwingern (Fig. 3) anwendet: Die Beschleunigung verstimmt den Orthogonalitätsfehler, womit ein deutlich zu sehendes Gleichtakt-Quadratursignal bei der Arbeitsfrequenz in die Schwinger 4₁ und 4₂

25

$$\Omega_Q = \frac{a_Q}{a_S} \cdot \frac{\omega}{2} = \alpha \frac{\omega}{2}$$

Hierbei ist Ω_Q die Quadraturdrehrate, a_Q die Quadraturbeschleunigung und a_S die Schwingerbeschleunigung.

30

Für eine Messgenauigkeit von z. B. 5 mg ($\alpha = 1.4 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$) ergibt sich

$$\Omega_Q = 0,0042 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 0,25^\circ/\text{s} = 866^\circ/\text{h} \quad \text{bei einer Eigenfrequenz von 1kHz}$$

35

$$\Omega_Q = 4,2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{rad}}{\text{s}} / 0,0025^\circ/\text{s} = 8,7^\circ/\text{h} \quad \text{bei einer Eigenfrequenz von 10kHz}$$

- Für einen Drehratensensor von $5^\circ/\text{h}$ lässt sich mit Sicherheit mit gleicher Elektronik die Quadraturdrehrate von $866^\circ/\text{h}$ nachweisen, dagegen ist bei der Eigenfrequenz von 10 KHz mit der Quadraturdrehrate von $8.7^\circ/\text{h}$ die Nachweisgrenze des Drehratensensors von $5^\circ/\text{h}$ nahezu ausgeschöpft. Ob diese
- 5 Messung auch langzeitstabil ist, hängt von der Langzeitstabilität der Quadraturdrehrate ab. Die eigentliche Quadraturdrehrate ist ein Gegentaktsignal. Deshalb hängt die Stabilität der Beschleunigungsmessung von der Differenz der Quadraturdrehraten von Schwinger 4_1 zu Schwinger 4_2 und deren Stabilität ab. Da beide Schwinger eng beieinander liegen und in einem Prozessschritt gefertigt
- 10 weren, wird man voraussichtlich einen Bereich mit niedriger Genauigkeit von 50 mg bis $50\text{ }\mu\text{g}$ abdecken können.

Patentansprüche

1. Corioliskreisel (1'), mit einem ersten und einem zweiten Resonator (70₁, 70₂), die jeweils als gekoppeltes System aus einem ersten und einem zweiten linearen Schwinger (3₁, 3₂, 4₁, 4₂) ausgestaltet sind, wobei der erste Resonator (70₁) mit dem zweiten Resonator (70₂) mechanisch/elektrostatisch so verbunden/gekoppelt ist, dass beide Resonatoren entlang einer gemeinsamen Schwingungsachse (72) gegentaktig zueinander in Schwingung versetzbar sind.
2. Corioliskreisel (1') nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Ausgestaltungen des ersten und des zweiten Resonators (70₁, 70₂) identisch sind, wobei die Resonatoren (70₁, 70₂) achsensymmetrisch zueinander angeordnet sind bezüglich einer Symmetrieachse (73), die senkrecht auf der gemeinsamen Schwingungsachse (72) steht.
3. Corioliskreisel (1') nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die ersten Schwinger (3₁, 3₂) jeweils durch erste Federelemente (5₁ - 5₈) mit einem Kreisrahmen (7₁ - 7₁₄) des Corioliskreisels verbunden, und die zweiten Schwinger (4₁, 4₂) durch zweite Federelemente (6₁ - 6₄) jeweils mit einem der ersten Schwinger (3₁, 3₂) verbunden sind.
4. Corioliskreisel (1') nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zweiten Schwinger (4₁, 4₂) an den ersten Schwingern (3₁, 3₂) durch die zweiten Federelemente (6₁ - 6₄) einseitig befestigt/eingespannt sind und/oder die ersten Schwinger (3₁, 3₂) an einem Kreisrahmen des Corioliskreisels durch die ersten Federelemente (5₁ - 5₈) einseitig befestigt/eingespannt sind.
5. Corioliskreisel (1') nach Anspruch 3 oder 4, **gekennzeichnet durch** eine Einrichtung zur Erzeugung elektrostatischer Felder, durch die ein Ausrichtungswinkel der ersten Federelemente (5₁ - 5₈) bezüglich des Kreisrahmens änderbar und/oder ein Ausrichtungswinkel der zweiten Federelemente (6₁ - 6₄) bezüglich der ersten Schwinger (3₁, 3₂) änderbar ist.
6. Corioliskreisel (1') nach Anspruch 5, **gekennzeichnet durch** eine Einrichtung (10₁ - 10₈, 11₁ - 11₄), mit der erste Signale für Drehrate und Quadraturbias, die innerhalb des ersten Resonators (70₁) auftreten, und zweite Signale für Drehrate und Quadraturbias, die innerhalb des zweiten Resonators (70₂) auftreten, ermittelbar sind,

- Regelkreise (60 - 67), durch die die Ausrichtung/Stärke der elektrostatischen Felder so geregelt wird, dass der erste und der zweite Quadraturbias jeweils möglichst klein wird, und

- 5 - eine Recheneinheit, die aus den ersten und zweiten Signalen die Drehrate ermittelt und aus einem Gleichtaktanteil der elektrostatischen Felder, die den ersten und zweiten Quadraturbias kompensieren, die zu messende Beschleunigung ermittelt.

10 7. Verfahren zur wahlweisen oder gleichzeitigen Messung von Drehraten und Beschleunigungen unter Verwendung eines Drehraten-Corioliskreisels (1'), der einen ersten und einen zweiten Resonator (70₁, 70₂) aufweist, die jeweils als gekoppeltes System aus einem ersten und einem zweiten linearen Schwinger (3₁, 3₂, 4₁, 4₂) ausgestaltet sind, wobei die Drehraten durch Abgriff und Auswertung der Auslenkungen der zweiten Schwinger (4₁, 4₂) bestimmt werden,
15 mit den folgenden Schritten:

- Versetzen der beiden Resonatoren (70₁, 70₂) in zueinander gegentaktige Schwingungen entlang einer gemeinsamen Schwingungsachse (72),
- Vergleichen der Auslenkungen der zweiten Schwinger (4₁, 4₂) untereinander, um einen Gegentakt-Auslenkungsanteil, der ein Maß für die zu
20 messende Drehrate ist, und/oder einen gemeinsamen Gleichtakt-Auslenkungsanteil, der ein Maß für die zu messenden Beschleunigung ist, zu ermitteln,
- Berechnen der zu messenden Drehrate/Beschleunigung aus dem Gegentakt-Auslenkungsanteil/Gleichtakt-Auslenkungsanteil.

25

8. Verfahren nach Anspruch 7,

dadurch gekennzeichnet, dass der gemeinsame Gleichtakt-Auslenkungsanteil wie folgt ermittelt wird:

- 30 - Bestimmen eines ersten Quadraturbias, der innerhalb des ersten Resonators (70₁) auftritt,
- Bestimmen eines zweiten Quadraturbias, der innerhalb des zweiten Resonators (70₂) auftritt,
- Verrechnen des ersten Quadraturbias mit dem zweiten Quadraturbias, um einen gemeinsamen Quadraturbiasanteil zu bestimmen, der der zu messenden
35 Beschleunigung proportional ist und den gemeinsamen Gleichtakt-Auslenkungsanteil darstellt.

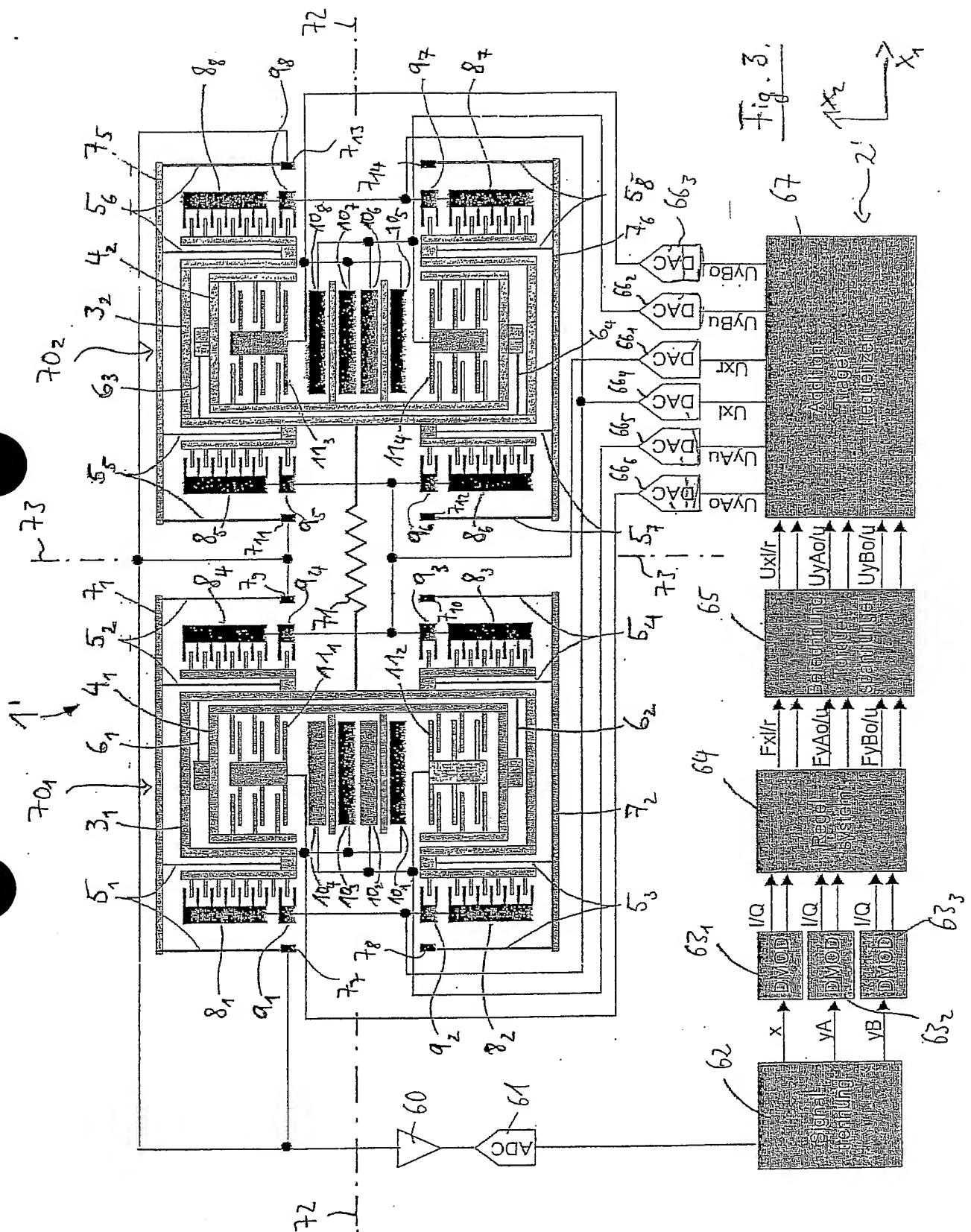
9. Verfahren nach Anspruch 8,
dadurch gekennzeichnet, dass elektrostatische Felder zur Änderung der
gegenseitigen Ausrichtung der ersten und zweiten Schwinger (3_1 , 3_2 , 4_1 , 4_2)
erzeugt werden, wobei die Ausrichtung/Stärke der elektrostatischen Felder so
5 geregelt wird, dass der erste und der zweite Quadraturbias jeweils möglichst klein
wird.

**Verfahren zur Messung von Drehraten/Beschleunigungen unter Verwendung
eines Drehraten-Corioliskreisels sowie dafür geeigneter Corioliskreisel**

Zusammenfassung

Ein Corioliskreisel (1') weist einen ersten und einen zweiten Resonator (70_1 , 70_2) auf, die jeweils als gekoppeltes System aus einem ersten und einem zweiten linearen Schwinger (3_1 , 3_2 , 4_1 und 4_2) ausgestaltet sind, wobei der erste Resonator (70_1) mit dem zweiten Resonator (70_2) entlang einer gemeinsamen Schwingungsachse (72) gegentaktig zueinander in Schwingung versetzbar sind. Vorteilhaft an einem derartig gekoppelten System ist, dass es gleichzeitig Drehrate und Beschleunigungen messen kann und unempfindlich gegenüber Störeinflüssen ist, wie beispielsweise extern oder intern bewirkte Vibrationen.

(Fig. 3)



Figur für die Zusammenfassung

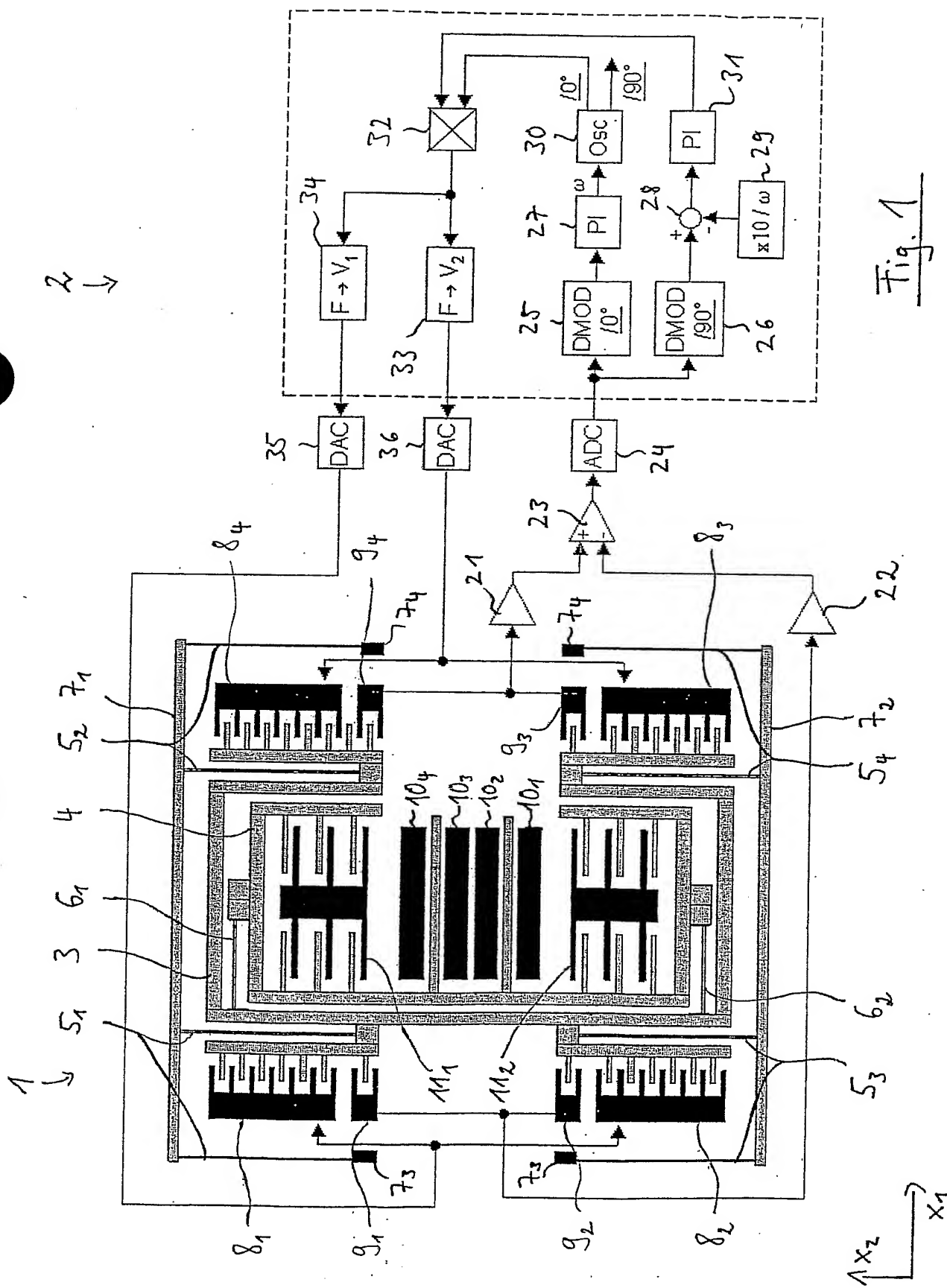
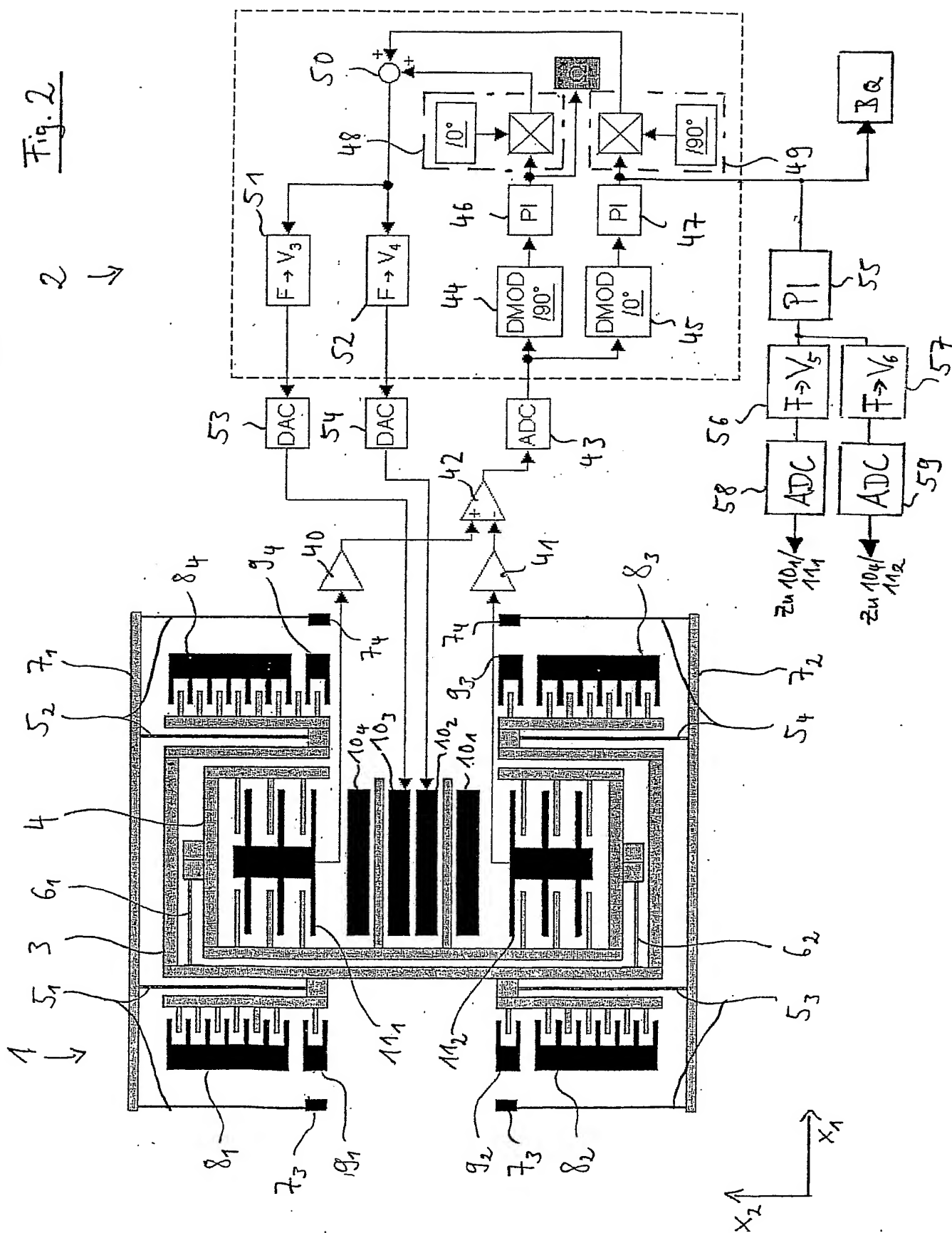


Fig. 1

Fig. 2



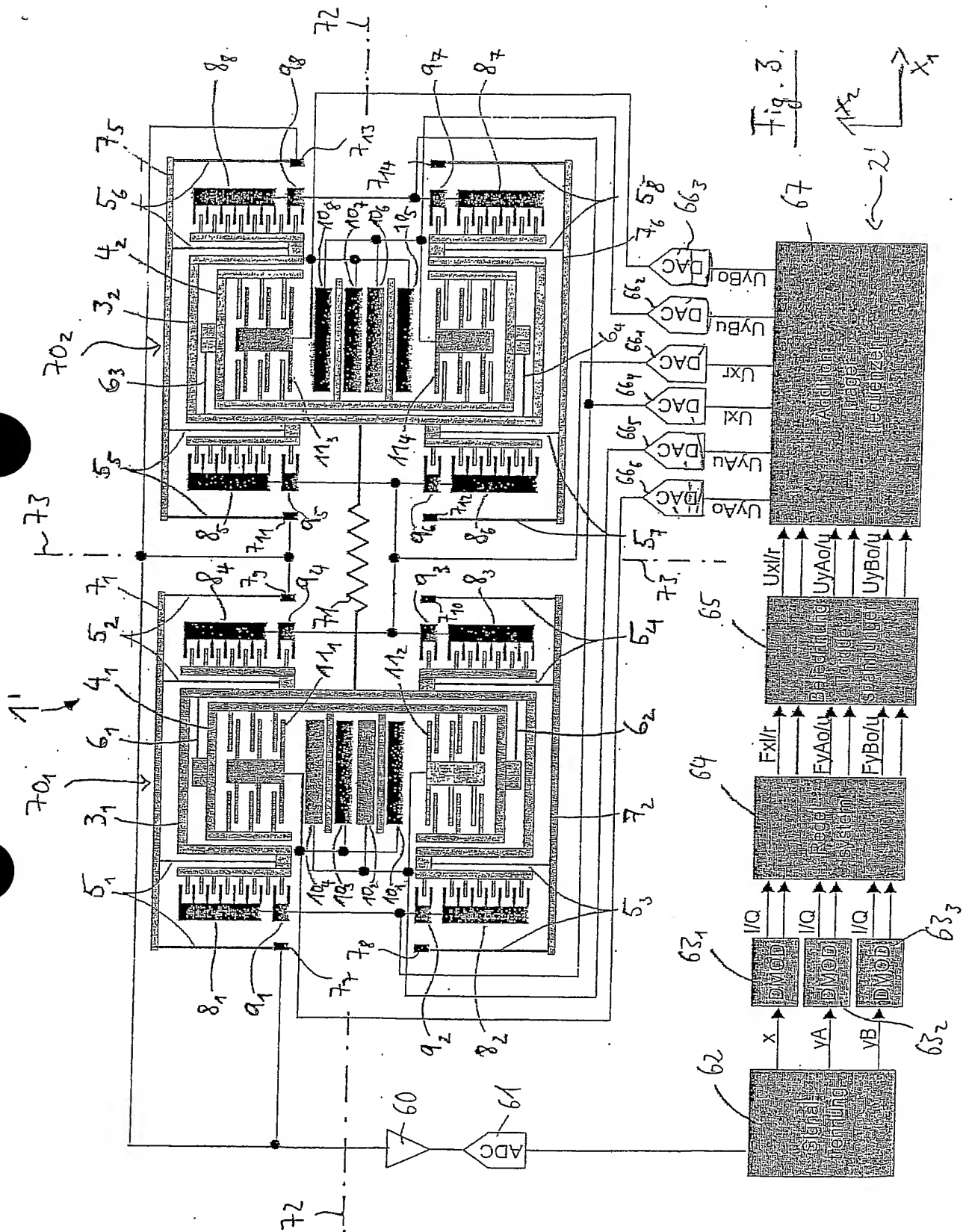


Fig. 3.

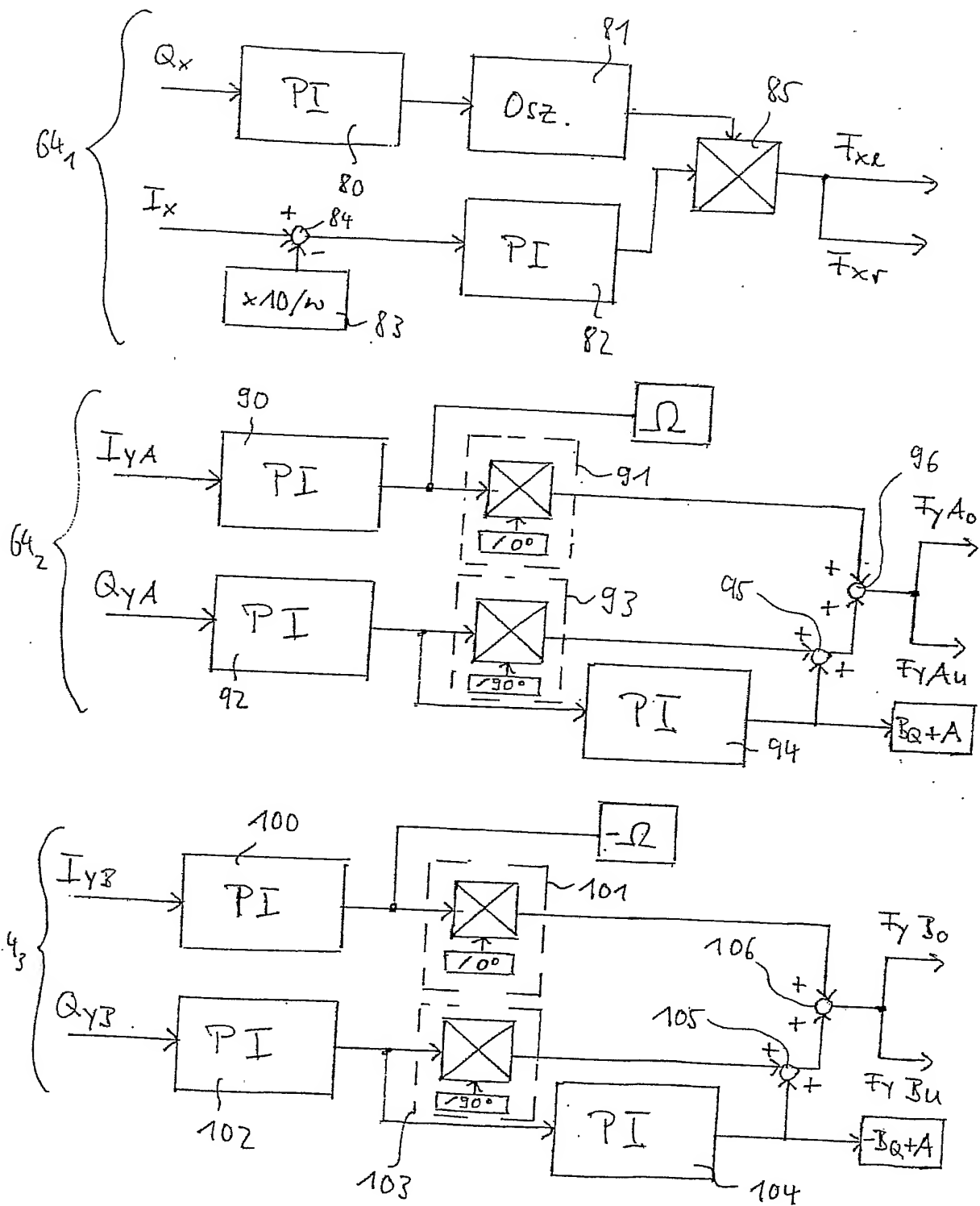


Fig. 4